

Tokyo Sky Tree: Angewandte Baurobotik als Garant für Qualität und Erdbebensicherheit

T. Bock, T. Linner, S. Miura, S. Vetter

Zusammenfassung Japan, das seit jeher von Erdbebenkatastrophen, Tsunamis, Taifunen, Bränden und Kriegszerstörung heimgesucht wird, bewältigte diese Katastrophen nicht nur, sondern sah in ihnen offensichtlich einen Grund, neue Technologien und moderne Konstruktionssysteme zu entwickeln. Mehr als 2.000 Erdbeben jährlich bzw. 60% der weltweiten Erdbeben und 30% der Tsunamis treten in Japan auf. Wie das Erdbeben im März 2011 (Stärke 9,0) ein weiteres Mal bewies, hat Japan hochmoderne Technologien für erdbebensicheres Bauen entwickelt. Das seit über 1300 Jahren weltweit viertstärkste Erdbeben verschob Japan über zwei Meter nach Osten, die Erdachse neigte sich um zehn Grad und rief einen verheerenden Tsunami hervor. Dennoch trat auf der laufenden Baustelle des Tokyo Sky Tree kein Schaden auf, obwohl das Erdbebenschwingungsdämpfungssystem, das hier beschrieben wird, sich noch im Bau befindet. Besonders Gebäude in Tokio und Umgebung müssen jährlich etliche hundert kleinere und größere Beben überstehen, ohne an der Konstruktion, an Bauelementen oder technischer Gebäudeausrüstung Schaden zu nehmen. Mit einer Höhe von 634 Metern ist der Tokyo Sky Tree (Tokyo Sukai Tsuru) das zweitgrößte von Menschen erstellte Bauwerk der Erde. Trotzdem ist der Turm eines der sichersten Gebäude, das je gebaut wurde. Dies ist möglich geworden durch die Verbindung von a) innovativem Design, b) hochentwickelter Technologie zur Schwingungsdämpfung und c) robotergestützten Bauprozessen. Die Japaner ließen sich hinsichtlich der Erdbebensicherheit durch das Shimbashira Dämpfungsprinzip der alten japanischen Pagoden inspirieren. Ein Shimbashira übersteigt die Ausmaße des Stuttgarter Fernsehturmes und agiert als zentrales Dämpfersystem. Die Firma Obayashi errichtete den Tokyo Sky Tree unter Verwendung von Arbeitstechniken und Bauelementen seines „Auto-

mated Building Construction Systems“ (ABCS) [5], welches seit 1980 entwickelt wurde. Es entstand um Montagearbeiten auf der Baustelle durch die Errichtung einer Fertigungsanlage vor Ort mit automatisierter Logistik, automatisierter Positionierung von Säulen und Trägern, automatisierter Schweißtechnik und Prozessüberwachung in Echtzeit in hohem Maße zu automatisieren. Da der 634 Meter hohe Bau ein außergewöhnliches Projekt ist, das hoher Präzision und technischer Unterstützung bedarf, war die Verwendung und Anpassung des ABCS im Fall des Tokyo Sky Tree höchst effizient.

Tokyo Sky Tree: Using Pagoda Technology

Abstract Ever since struck by frequent earthquake disasters, tsunamis, typhoons, fires and war destruction, Japan not only overcame those disasters but obviously used them as a reason to develop new technologies and advanced construction systems. More than 2,000 earthquakes yearly or rather 60 % of earthquakes worldwide and 30% of Tsunamis happen in Japan. As it has been proved by the March 2011 earthquake (strength: 9,0) once more, Japan has developed highly advanced earthquake resistance technologies. The fourth largest earthquake for 1,300 years moved Japan two meters to the east, tilted the axis of the Earth around ten angular degree and induced a devastating tsunami. Still, no damage occurred at the building site of the Tokyo Sky Tree although the earthquake damping system, that is described here, still was under construction. Especially buildings in the Tokyo area have to endure several hundred smaller and larger shakings per annum without letting them cause damage to structure, sub-components and technical infills. With a height of 634 meters, the Tokyo Sky Tree (*Tokyo Sukai Tsuru*) is the world's second largest man-made structure on earth. However, the tower is one of the safest buildings ever built. This has been enabled by a fusion of a) cutting edge structural design, b) advanced damper technology and c) robot supported construction processes. Obayashi constructed the Tokyo Sky Tree by using techniques and components of its Automated Building Construction System (ABCS) which they have been developing since the 1980s. It was designed to automate on-site assembly operations to a high degree by installing an on-site factory, with automated logistics, automated column and beam positioning, automated welding and real-time process control. As the Tokyo Sky Tree with its 643 meters height is an extreme project and requires high precision and technical support, using and adjusting the ABCS Sub-systems for this tall structure was highly efficient.

Thomas Bock, Prof. Prof. h. c. /

SRSTU Dr.-Ing./Univ. Tokio
Lehrstuhl für Baurealisierung und Baurobotik
Fakultät für Architektur
Technische Universität München
Arcisstr. 21, 80333 München

Thomas Linner, Dipl.-Ing. Univ.

Wissenschaftlicher Assistent
Lehrstuhl für Baurealisierung und Baurobotik
Technische Universität München

Shino Miura

Studentin
The University of Tokyo
Graduate school of Frontier Sciences,
Nezu 2-23-11-405 Bunkyo-ku
Post code 113-0031, Tokyo

Sophie Vetter

Studentin
Lehrstuhl für Baurealisierung und Baurobotik
Technische Universität München

1 Einführung

Mit einer Höhe von 634 Metern ist der Tokyo Sky Tree das zweitgrößte von Menschen erstellte Bauwerk der Erde (**Bild 1**), lediglich überragt vom Burj Chalifa (850 m) in Dubai und gefolgt vom Canton Tower (600 m) in Ganzhou, CN Tower (553 m) in Toronto und Ostankino Tower (540 m) in Moskau. Bekannte Türme wie Sears Tower (527 m), Taipei 101 (508

m) und die Petronas Towers (452 m) sind bedeutend kleiner. Obwohl der Tokyo Sky Tree in einem seismisch stark aktiven Gebiet steht (in der Gegend um Tokio werden ca. 60 bis 70 spürbare Erdbeben jährlich gemessen), ist der Turm eines der sichersten Gebäude, das jemals gebaut wurde. Dies ist möglich geworden durch die Verbindung von innovativer Konstruktionstechnik, hochentwickelter Technologie zur Schwingungsdämpfung und einem präzisen roboterassistierten Bauprozess. Des Weiteren wird der Turm nach einer zweijährigen Entwurfsphase (2007/2008) innerhalb von weniger als 3,5 Jahren (Juli 2008 bis Dezember 2011) fertiggestellt sein. Zum Vergleich: Der Bau des nur 150 m hohen Münchner Olympiaturms dauerte mehr als drei Jahre und der Bau des Burj Chalifa mehr als sechs Jahre.

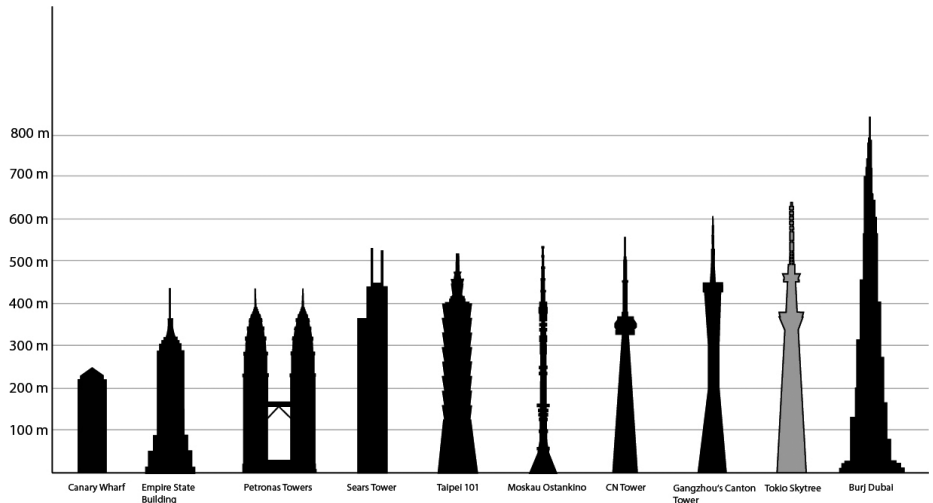


Bild 1. Der Tokyo Sky Tree ist das zweitgrößte, von Menschen erstellte Bauwerk auf der Erde, lediglich übertroffen vom Burj Chalifa (830 m) in Dubai und gefolgt vom Canton Tower (600 m) in Gangzhou, CN Tower (553 m) in Toronto und Ostankino Tower (540 m) in Moskau. © H. Ngyuen

Fig. 1. The Tokyo Sky Tree is the world's second largest man-made structure on earth only topped by Dubai's Burj Chalifa (830 m) and followed by Gangzhou's Canton Tower (600 m), Toronto's CN Tower (553 m) and Moscow's Ostankino Tower.

1.1 Standort: Stadt mit einem Turm

Obayashi, einer der größten und technologisch am meisten fortgeschrittenen Bauunternehmer Japans, leitet die Ingenieursarbeit und Bauausführung des Tokyo Sky Tree, der vom japanischen Architekturbüro Nikken Sekkei Ltd. entworfen wurde. Der Turm mit einer Höhe von 634 Metern steht mitten in Tokio, im Stadtteil Sumida in einem stark frequentierten und beliebten Gelände zwischen der Station Narihira-bashi und der Station Oshiage. Der Sky Tree Tower wird Teil einer riesigen 3,69 Hektar großen Grundstückserschließung sein, die sich zwischen diesen zwei Stationen aufspannt [1]. Sie wird Büroräume, Einkaufsmöglichkeiten, Wohngebiete, Plätze und weitere Gemeinschaftseinrichtungen beinhalten, die von Besuchern sowie benachbarten Bewohnern benutzt werden können. Aufgrund seiner Größe nennt sich das neue Bauvorhaben mit dem Sky Tree als Landmarke „Stadt mit einem Turm“ („Town with a Tower“). Es ist außerdem nur ca. einen Kilometer entfernt von Asakusa, einem Areal mit vielen Heiligenschreinen und vielen kleinen traditionellen Gebäuden. Das Bauvorhaben berücksichtigt daher eine Reihe strategisch gut geplanter und hinsichtlich des Transportwesens und der Zugänglichkeit perfekter organisierter Entwicklungen aus anderen Stadtteilen, die ähnlich heterogen und stark frequentiert sind. Ebenso wie in Roppongi Hills und O'Daiba, geht das Bauprojekt um den Sky Tree auf die Innenstadtlage mit hoher Funktionsdichte ein.

1.2 Wertschöpfung durch multifunktionale Beplanung

Der Tokyo Sky Tree selbst wird in erster Linie als Funkturm dienen, jedoch seinen Bau durch eingegliederte Funktionen für Touristen wie Restaurants und Aussichtsplattformen rückfinanzieren. Tokios früherer wichtigster Funkturm (333 m) für digitales Fernsehen ist heute von einer Vielzahl genauso hoher Hochhäuser umgeben, die seine Leistungsfähigkeit schwächen. Den wachsenden Anforderungen im digitalen Rundfunk kann der alte Turm daher nicht mehr gerecht werden. Der Sky Tree erfüllt diese Anforderungen und stellt Raum bereit für zukünftige technologische Entwick-

lungen. Im Juli 2011 wird die analoge Übertragung des Fernsehfunks eingestellt und die Rundfunktechnologie wird komplett auf die digitale Übertragung umgestellt werden. Zusätzlich erfordert ein neuer höchst effizienter digitaler Service für Mobiltelefone aus dem Jahr 2006, dass die Signale idealerweise von extremen Höhen gesendet werden um Störungen zu vermeiden. Ferner sind Konzepte in der Entwicklung, die darauf abzielen, den Sky Tree Tower als Zentrum des Katastrophenmanagements zu verwenden und ihn mit Technologien zur Prävention, d. h. Wahrnehmungs-, Kommunikations- und Kontrollinstrumenten auszustatten. Die anfängliche Investition in den Tokyo Sky Tree umfasst Kosten für die Erschließung, den Entwurf und die Errichtung und beläuft sich auf 725 Millionen US Dollar.

1.3 Funktionsorientierter Entwurf

Die Form des Turms ist das Ergebnis der Überlagerung etlicher Erfordernisse an Stabilität, Funktion, Herstellung und Erscheinung, welche zu einem komplexen Satz an Entwurfsparametern führt, die aufeinander abgestimmt werden mussten. Vom Boden bis zur Spitze ändert er mehrmals die Form, trotzdem erscheint er als eine wohlgestaltete Einheit (Bild 2). Bis zu ca. 50 Metern Höhe ruht der Turm auf einem Tragwerk, ähnlich einem Dreibein, das es erlaubt, die Kräfte des Bauwerks auf konzentrierte und optimierte Weise in die Fundamente zu leiten. Zwischen 50 und 200 Meter Höhe stellt eine dreieckige Struktur die Stabilisierung bei horizontal angreifenden Kräften sicher. Oberhalb von 200 Metern geht die dreieckige Struktur nahtlos in eine runde Struktur über, um den Einfluss horizontaler Windkräfte auf den Turm zu verringern. In der Höhe von 350 Metern und 450 Metern legen sich kegelförmige Ringe um das dünnere Tragwerk des Turms. Sie beinhalten nicht nur Restaurant und Observationseinrichtungen, sondern unterstützen auch Stabilität und Balance des Turms. Vor allem erlaubt diese strukturelle Gestaltung eine Modularisierung in höchst stabile, fabrikgefertigte und großformatige Stahlsegmente. Um die Arbeitsbelastung zu reduzieren und die Präzision der Verbindungen zu erhöhen, waren wichtige Verbindungselemente an den meisten Bauteilen vorinstalliert. Das Zentrum des Turms ist



Bild 2. Vom Boden bis zur Spitze ändert der Turm mehrmals seine Form, um verbesserte Eigenschaften zu erreichen; trotzdem erscheint er als eine wohlgestaltete Einheit. © T. Bock
 Fig. 2. In order to achieve enhanced performance, the tower changes its form several times. Nevertheless, it appears as a well-designed entity.

als Schaft aus Beton gefertigt, der Dienste wie Aufzüge und Leitungskanäle beinhaltet. Die hochentwickelte digitale und analoge Technologie zur Schwingungsdämpfung, abgeleitet von der traditionellen Baumethode „Shimbashira-Seishin“, stellt die Aufnahme von Vibrationen bei mehreren hundert Erdbeben pro Jahr in Tokio sicher.

2 Erdbebensicheres Bauen in Japan

Wie das Erdbeben im März 2011 (Stärke 9,0) ein weiteres Mal bewies, hat Japan hochmoderne Technologien für erdbebensicheres Bauen entwickelt. Im Allgemeinen können folgende Strategien zur kontrollierten Abschwächung der durch das Erdbeben ausgelösten Schwingungen unterschieden werden:

Passives Kontrollsystem

Seismische Aktivitäten werden durch passive Elemente, die in den Entwurf und das Tragwerk integriert sind, ausgeglichen. Das Funktionieren des Systems wird ohne mikroelektronische Instrumente wie Sensoren oder Aktoren sichergestellt. Grundlegende Systeme sind die auf Leistung gebrachten Schwingungsdämpfer (Tuned Mass Dampers, TMD), auf Leistung gebrachte Schwingungsdämpfer, die mit Flüssigkeit arbeiten (Tuned Liquid Dampers, TLD), Entkopplung des Fundaments (Base Isolation, BI) und Schwingungsdämpfer, die über die Aufnahme von Reibungsenergie funktionieren (Frictional Dampers, FD).

Aktives Kontrollsystem

Aktive Kontrollsysteme nutzen in großem Maße verteilte mikroelektronische Systeme, die in das Tragwerk und die Schwingungsdämpfer eingebaut sind. Ein Sensorsystem er-

fasst die seismische Aktivität (Stärke und Art der Wellen) und ermittelt die Auswirkungen auf das Bauwerk. Mit Hilfe der Sensordaten werden am Gebäude und der Gebäudestruktur angebrachte Dämpfungssysteme aktiv so angesteuert, dass sie die seismische Aktivität minimieren oder in manchen Fällen sogar auf null reduzieren.

Hybrid Kontrollsystem / Halbaktive Kontrollsysteme

Elemente passiver und aktiver Vibrationskontrolle werden kombiniert. Zum Beispiel werden Vibrationen von einem passiven Schwingungsdämpfer kompensiert, welcher zur Leistungssteigerung und durch Motoren oder andere Aktuatoren aktiv neu positioniert werden kann.

2.1 Erdbebensicherheit der traditionellen japanischen Häuser

Japan hat eine lange Geschichte in der Entwicklung erdbebensicherer Fügungen. Schon das traditionelle japanische Haus wurde aus einem hochflexiblen Baukastensystem errichtet, das es dem Gebäude erlaubte, sich auf kontrollierte Art und Weise zu bewegen und zu wanken, wodurch die Vibrationen aufgenommen wurden. Darum wurden die Balken und Stützen eines solchen Hauses nur zusammengesteckt und nicht fix verbunden oder genagelt. Ursprünglich wurden auch die Stützen nicht mit dem Fundament verbunden, nur eine Mittelpfeiler oder ein zentrale Stütze bildeten eine Art Rückgrat, das es den anderen Stützen somit erlaubte, sich auf dem Fundament zu bewegen und dadurch einwirkende Kräfte abzubauen [2].

2.2 Vorgefertigte Gebäude: 100 % erdbebensichere Produkte!

Heute bieten insbesondere die japanischen „Prefabmaker“ Wohnhäuser mit optionalen Modulen und Elementen an, die Erdbebensicherheit garantieren. Die angewendeten Techniken sind keine Kopien der traditionellen oben beschriebenen Technologien, sondern vielmehr moderne Neuinterpretationen davon. Sie basieren auf denselben Prinzipien, sind darüber hinaus an neue Konstruktionsmaterialien angepasst (Stahl), durch neue Materialien zur Schwingungs- und Vibrationsdämpfung unterstützt (siehe später bzgl. des Tokyo Sky Tree) und durch neue aktive Komponenten verbessert.

Die Firma „Sekisui House“ bietet beispielsweise Häuser an, die aus vorgefertigten Stahlpaneelen hergestellt sind. Diese werden von Robotern sehr präzise zusammengesetzt und –geschweißt (Bild 5). Durch die hohe Qualität erreicht das Gebäude hohe Erdbebensicherheit. Ferner werden die Fassadenplatten mit eigens entworfenen und patentierten Haken am Gebäude befestigt. Diese geben dem Gebäude einen Spielraum damit es sich im Falle eines Erdbebens in einem gewissen Rahmen bewegen kann, halten sie aber trotzdem so sicher, dass sie nicht von den Rahmenkonstruktionen abfallen und Menschen verletzen oder an Straßen oder dem Gebäude selbst Schaden verursachen können [3].

Ein weiterer wichtiger Schritt war die Entwicklung der Dämmungstechnologie mit viskoelastischem Material seit den 80er Jahren. Bauunternehmer für Vorfabrikation wie „Sekisui House“ und „Daiwa House“ bieten heute fortgeschrittene Paneele zur Vibrationskontrolle. Diese Paneele sind Stahlrahmen mit einer Aussteifung. Im Verschneidungspunkt sind viskoelastische Elemente positioniert, die die Energie der Erdbebenvibrationen aufnehmen. Die absorbierte Energie wird in Form von Wärme wieder abgegeben. Nicht alle Paneele des Gebäudes müssen mit einer



Bild 3. Die Firma „Sekisui House“ bietet Häuser an, die aus vorgefertigten Stahlpaneelen hergestellt sind. Diese werden von Robotern sehr präzise zusammengesetzt und -geschweißt. Durch die hohe Qualität erreicht das Gebäude hohe Erdbbensicherheit [3].
© T. Linner/ T. Bock

Fig. 3. Japan's company "Sekisui House" provides houses that are made up of prefabricated steel frames. They are being put and welded together by robots. Due to the high quality, the building is highly earthquake resistant [3].

Ausfachung und viskoelastischem Material ausgestattet sein. Zwei oder drei Paneele in jedem Geschoss und an strategisch wichtigen Positionen sind ausreichend.

Ebenso bieten die genannten Firmen zur Fundamentdämmung das sogenannte Base Insulation System an, welches das Gebäude vom Untergrund entkoppelt – dieses System ist am effizientesten, aber auch am teuersten! Basierend auf dem Prinzip der traditionellen japanischen Häuser, wo ein Mittelpfeiler im Untergrund verankert wird und sich die anderen Stützen bei Vibrationen auf dem Fundament bewegen können, lässt das heutige System zur Fundamentdämmung das Gebäude auf einer Art Teller ruhen (sliding isolation system). Dieser entkoppelt das Gebäude vom Untergrund und fängt dadurch horizontale Schwingungen auf. Um das entkoppelte Gebäude an seiner Position zu halten, wird es von horizontal gelagerten Schwingungsdämpfern gehalten. Das System stellt sicher, dass die Vibrationen des Erdbebens nicht in die Konstruktion des Gebäudes weitergeleitet werden. Die Wellen des Erdbebens passieren das Gebäude in der Ebene des Fundaments und Schwingungen im Gebäude sowie Schäden an Gebäude und Mensch werden minimiert. Dieses System zur Fundamentdämmung ist so effizient, dass es z. B. Paneele zur Vibrationskontrolle, wie beschrieben, unnötig macht.

2.3 Erdbbensimulatoren

In der Entwicklung, Prüfung und Zertifizierung von Technologien zur Erdbbensicherheit sind die sogenannten Erdbbensimulatoren ein Kernstück. Die meisten und größten

Erdbbensimulatoren, die auf der Welt existieren, befinden sich in Japan. Das Große Hanshin Erdbeben von 1995 war ein Wendepunkt in der Forschung zur Prävention von Katastrophen in Japan. Es wurde offensichtlich, dass bestehende Strategien und Technologien nicht ausreichten. Besonders die Entwicklung von realistischen Umgebungen für Tests wie die 3D Erdbbensimulatoren in Lebensgröße wurde dann als unumgänglich angesehen und von der Regierung errichtet. Heute besitzt eine Vielzahl von Institutionen Erdbbensimulatoren. Die Besitzer können in vier Kategorien unterteilt werden:

- Unabhängige Verwaltungen
- Universitäten
- Große Bauunternehmer und Gebäudefirmen
- Elektrofirmen und Firmen für Hausgerätetechnik

In Japan spielt das nationale Forschungsinstitut eine wichtige Rolle. Diese Institute besitzen auch die neuesten 3D Erdbbensimulatoren in Lebensgröße. Doch Universitäten und größere Firmen entwickeln auch eigene Einrichtungen für Tests, die an ihre Anwendungen angepasst sind. Elektrofirmen und Firmen für Hausgerätetechnik haben eher kompakte und einfache Tische um Möbel zu testen. Die meisten Besitzer von Erdbbensimulatoren vermieten ihre Anlagen auch zeitweise für Tests kleinerer Firmen wodurch Erdbbensimulatoren heute für fast alle Unternehmen verfügbar sind. Der weltgrößte Erdbbensimulator „E-Defense“ steht in Hyogo City, Japan, ist 20 m x 15 m groß und kann eine Auflast von 1200 Tonnen in Bewegung bringen. Zum Vergleich: 303 Erdbbensimulatoren existieren weltweit, aber die meisten können nur Lasten bis zu 50 Tonnen aushalten. Das nationale Forschungsinstitut für Geowissenschaften und Katastrophenprävention (NIED, National Research Institute for Earth Science and Disaster) hat den E-Defense im Jahr 2005 gebaut und steht seitdem an der Spitze der Studien über Erdbeben weltweit. NIED und das Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie Japan (MEXT, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology Japan) kooperieren international mit der amerikanischen Staatlichen Stiftung der Wissenschaft (NSF, National Science Foundation) und dem George E. Brown, Jr. Netzwerk für Erdbebentechnik und -simulation (NEES, The George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation), indem sie gemeinsame Forschungsprojekte über den E-Defense und moderne Computersimulationen betreiben.

2.4 Erdbbensichere Türme

Ähnlich dem Vorgehen der Firmen Sekisu und Daiwa wurde auch im Falle des Tokyo Sky Tree traditionelles Architektenwissen angewendet, angepasst und schließlich verbessert. Die bewährte Technologie des „Shimbashira-Seishin“, das für fünfstöckige Pagoden verwendet worden ist, wurde an den Tokyo Sky Tree angepasst und durch eine Kombination mit anderen passiven und aktiven Kontrollsystemen verbessert. Die entstandene neue hybride Technologie zur Erdbbensicherheit macht den Sky Tree sicherer als jedes andere Gebäude ähnlicher Höhe.

Pagoden sind mehrstöckige, turmähnliche Gebäude, die man in Vietnam, China, Korea und Japan findet. Zu Beginn wurden sie hauptsächlich zur sicheren Verwahrung von Knochen und anderen sterblichen Überresten bekannter buddhistischer Mönche verwendet. Später fanden sie allgemeinere Verwendung und wurden Teil der architekto-

nischen Kultur, vor allem in China. In Japan ist die Pagode immer noch ein zentrales Element in Gebieten um Tempel und Heiligenschreine. Wie Studien zeigen [4], ist der „shimbashira“ ein typisches Element der japanischen Pagoden, die regelmäßig Erdbeben ausgesetzt sind, kann aber nicht in China und Korea gefunden werden, da diese nicht oder zumindest nicht regelmäßig von Erdbeben betroffen sind (Bild 4).

Die Verwendung des Technologie „Shimbashira-Seishin“ in japanischen Pagoden veränderte und entwickelte sich in einem Prozess des systematischen Ausprobierens über die Zeit (Bild 5). Frühe Pagoden wie die Horyuji Pagode (ca. 670) hatten einen „shimbashira“-Mast, der auf einem „shin-so“-Stein ruhte, welcher in der Erde vergraben und fixiert war (Bild 5a). Doch das feuchte Klima und lange Regenzeiten führten zu einem Rückgang der eingegrabenen „shimbashira“, weil es sich als ineffizient herausstellte. Somit wanderten der „shimbashira“ und „shin-so“ schrittweise nach oben und wurden mehr und mehr oberhalb der Erde angebracht (Bild 5b, c). Ferner war der „shimbashira“ nicht mehr steif fixiert. Nachdem jedes Geschoss entkoppelt und horizontal in einem gewissen Rahmen beweglich war, konnten die Segmente leicht um die „lose“ „shimbashira“ „rotieren“. In einer letzten Phase wurde ein Teil des „shimbashira“ entkoppelt und mit gewaltigen Stahlketten im Zentrum der Pagode aufgehängt. Sie bildetet eine Art riesiges Pendel und Schwingungsdämpfer, der die Energie der Erdbeben-vibrationen aufnahm (Bild 5d, e). Schließlich konnte der „shimbashira“ sowohl Energie aufnehmen als auch die Segmente rotieren lassen.

Im Jahr 2002 wurde die „shimbashira“-Technologie auf das Marunouchi Gebäude übertragen, welches 36 Geschosse hat, 198 Meter hoch ist und nahe der Station „Tokyu“ steht (Bild 6a). Mitsubishi entwickelte das Gebäude als Gebäudekomplex mit gemischten Funktionen wie Geschäften und Büros und dem „shimbashira“ als wesentlichem Element (Bild 6b). Er ist mit dem Tragwerk jedes Geschosses verbunden und fungiert somit sowohl als Schwingungsdämpfer als auch als aussteifendes Element. Neben dem „shimbashira“-Prinzip haben die Pagoden auch gezeigt, dass

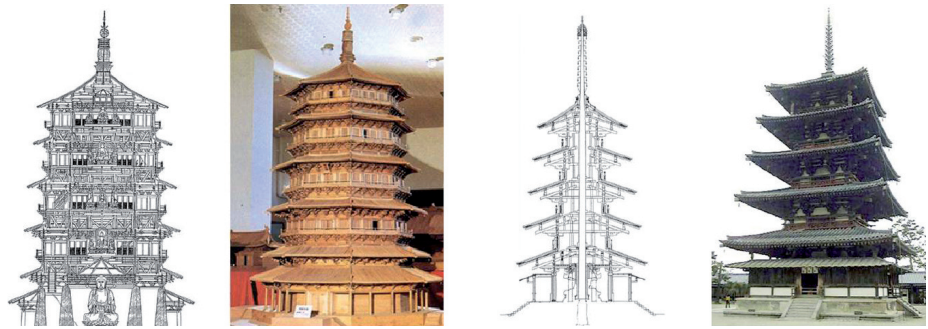


Bild 4. Studien zeigen, dass der „shimbashira“ ein typisches Element der japanischen Pagoden ist, die im Gegensatz zu chinesischen und koreanischen Pagoden regelmäßig starken Erdbeben ausgesetzt sind. Links: Chinesische Pagoden, Rechts: Japanische Pagoden mit „shimbashira“. © Prof. Suematsu, Nagoya and Prof. Atstushi Ueda Book (ISBN 4-10-600491-7)

Fig. 4. Studies show that the “shimbashira” is a typical element of Japanese Pagodas that face unlike Chinese and Korean pagodas strong earthquakes regularly. Left: Chinese Pagoda Right: Japanese Pagoda with “shimbashira”.

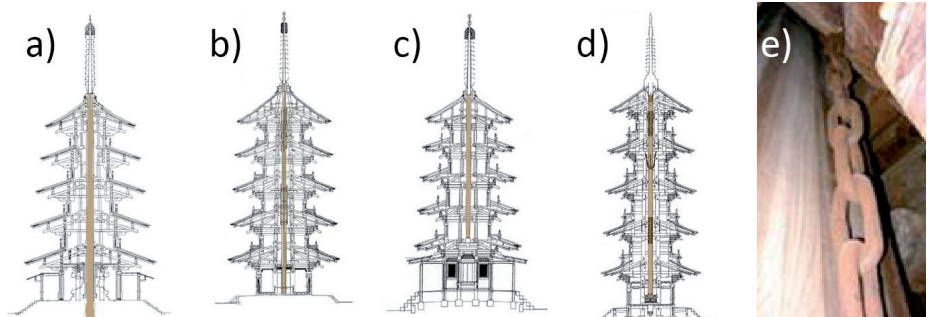


Bild 5. Die Verwendung des „shimbashira“-Elements in japanischen Pagoden veränderte und entwickelte sich in einem Prozess des systematischen Ausprobierens über die Zeit. © Prof. Suematsu, Nagoya and Prof. Atstushi Ueda Book (ISBN 4-10-600491-7)

Fig. 5. The use of the “shimbashira” element in Japanese Pagodas changed and evolved in a trial- and-error like process over time.

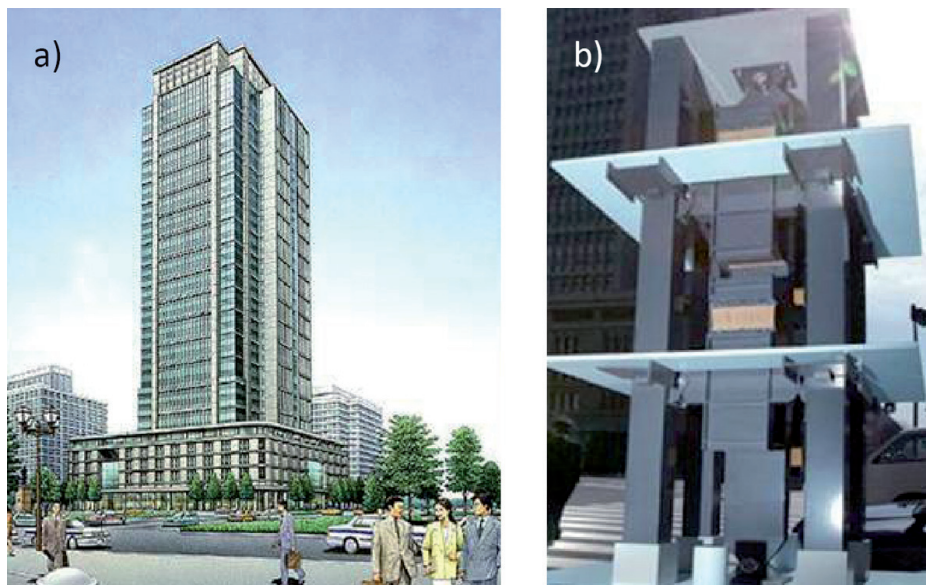


Bild 6. Im Jahr 2002 wurde die „shimbashira-seishin“-Technologie auf das 198 Meter hohe Marunouchi Gebäude in Tokyo übertragen. Links: Gebäudeansicht. Rechts: „Shimbashira“ als wesentliches Element des Tragwerks. © Prof. Suematsu, Nagoya and Prof. Atstushi Ueda Book (ISBN 4-10-600491-7)

Fig. 6. In 2002, “Shimbashira-Seishin” (Center Column Vibration Control) was applied to the 198 meter high Marunouchi building in Tokyo. Left: View of the building. Right: “Shimbashira” as a major element of the structure.

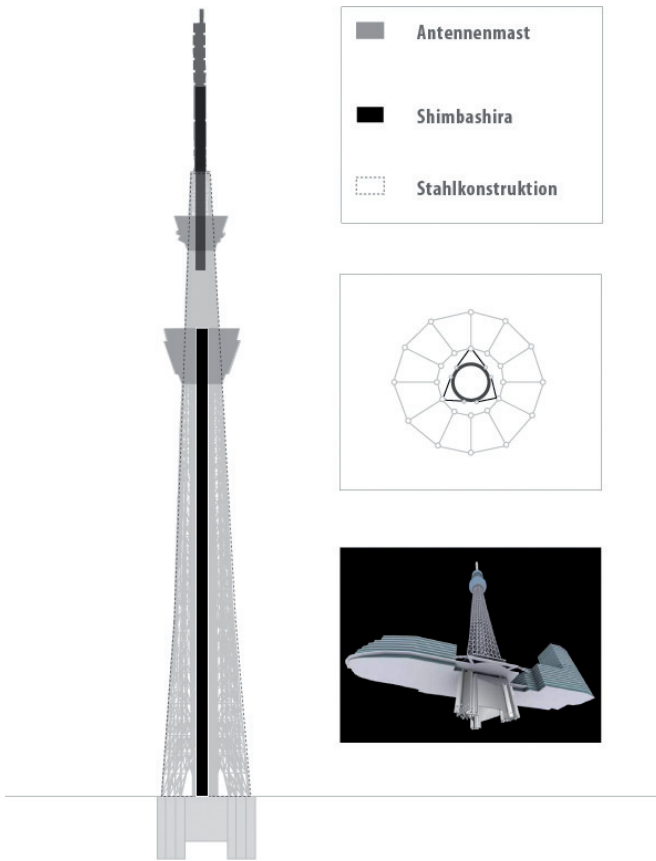


Bild 7. Der Tokyo Sky Tree ist ein mehrfach segmentiertes System, das es den individuellen Segmenten erlaubt, an verschiedenen Stellen des Gebäudes unterschiedlich auf die Vibrationen zu reagieren. Links: Mehrfach segmentierte Struktur. Rechts oben: Der innere Betonkern („shimbashira“) und die äußere Stahlstruktur sind mit Öldämpfern verbunden, welche beiden Segmenten unterschiedliche Bewegungen erlauben. Die Öldämpfer nehmen die Energie dann auf. Rechts Mitte: Schnitt durch den Turm auf Shimbashira Höhe. Rechts unten: Verzweigtes, wandähnliches Fundament-System, das wie die Wurzeln eines Baumes in den Boden getrieben ist. (Copyright Bock, Linner – eigene Interpretation). © H. Ngyuen

Fig. 7. The Tokyo Sky Tree is a multi-segment system that allows the individual segments to respond differently to the vibrations. Left: Multi-Segment Structure. Top Right: The inner concrete core and the outer steel structure are linked via oil dampers allowing both segments an individual movement. The oil damper then absorbs the energy. Down Right: Spiked, dispersed and wall-like foundation system that is driven into the ground like the roots of a tree (Copyright Bock, Linner – own interpretation)

unabhängige Segmente oder Geschosse die Reaktion von Gebäuden auf Erdbeben positiv beeinflussen können. Jedes Geschosselement der Pagode war entkoppelt von sowohl dem Segment darüber als auch darunter und konnte deshalb horizontal gleiten. Eine ähnliche Technik wird heute z. B. in mehrstöckigen Gebäuden angewendet. Die Geschosse sind voneinander entkoppelt und lagern auf gleitenden Isolationssystemen. Heute können horizontale Kräfte auch von Schwingungsdämpfern und Zugfedern absorbiert werden, welche in horizontaler Achse nahe dem Gleitlager angeordnet sind. Dieses Schwingungsdämpfer- und Zugfeder-System kann auf jedes Geschoss angewendet werden oder auch auf strategisch wichtige Segmente des Gebäudes. Es zeigt ebenfalls, dass neue Systeme nicht durch pure Imitation sondern durch Neuinterpretation einiger Elemente geschaffen werden (Entkopplung der Geschosse), Hinzufügen neuer Elemente (Öldämpfer oder Federn) oder sogar das Beibehalten von Elementen (shimbashira).

Der Tokyo Sky Tree ist dabei keine Nachahmung des „shimbashira“-Prinzips der Pagoden, sondern eine komplexe

Neuinterpretation, die mit einer Vielzahl hochmoderner Techniken verbunden worden ist. Im Allgemeinen ist es ein mehrfach segmentiertes System, das es den einzelnen Bausteinen erlaubt, auf die Vibrationen unterschiedlich zu reagieren. An verschiedenen Stellen des Bauwerks muss anders auf die Schwingungen reagiert werden. Dafür ist der bewehrte Betonkern von der äußeren Stahlstruktur entkoppelt und der Antennenmast an der Spitze ist entkoppelt von dem unteren Betonkern („shimbashira“) darunter (Bild 7). Zusammengehalten werden beide Bauteile von der äußeren Stahlkonstruktion, von der sie durch Dämpfer entkoppelt sind. Daher spricht man von drei unabhängigen Bauteilen. Die Art und Weise und Stärke der Verbindung zwischen dem inneren Betonkern und der äußeren Stahlkonstruktion ändert sich zudem über die Höhe des Turms.

Von 0 bis 125 Meter sind die beiden Strukturen fest miteinander verbunden und bilden einen festen Sockel. Dieser ist durch ein innovatives Fundament-System im Untergrund verankert. Verzweigte wandähnliche Scheiben sind wie die Wurzeln eines Baumes in den Untergrund getrieben. Die Wand ist überall mit Metalldornen versehen, welche dem Fundament sichere Haftung verleihen, auch im Falle extremer Windkräfte, die auf die 632 Meter hohe Struktur einwirken können. Von 125 bis 375 Meter sind der Betonkern und die Stahlstruktur durch Öldämpfer verbunden. Wären alle Teile des Turms fest miteinander verbunden, würden sich die Vibrationen über die Höhe des Gebäudes vervielfältigen. Der Bereich oberhalb von 375 Metern kann sehr flexibel auf Windkräfte reagieren und Vibrationen aus dem Erdboden gegensteuern. Durch die angewandte Strategie der Entkopplung von Shimbashira, Antennenmast und Stahlkonstruktion kann die Stärke der seismischen Aktivität, die auf das Gebäude einwirkt, um 60 % reduziert werden.

3 Robotik gestützter Bau des Tokyo Sky Tree

Obayashi hat den Tokyo Sky Tree unter Verwendung von Sub-Systemen seines „Automated Building Construction Systems“ (ABCS) erbaut. Obayashi hat das ABCS seit 1980 kontinuierlich weiterentwickelt, um Montagevorgänge vor Ort in hohem Maße zu automatisieren. Das geschieht durch den Aufbau einer sich vertikal nach oben bewegendes Fabrik vor Ort mit automatisierter Logistik, automatisierter Positionierung von Stützen und Trägern, automatisierter Schweißtechnik und digitaler Echtzeit-Prozessüberwachung [7], [8].

Eine vertikal bewegliche „Fabrik“ (SCF, Super Construction Factory) befindet sich am oberen Ende des Gebäudes und bewegt sich während des Bauprozesses Geschoss für Geschoss nach oben (Bild 8). Ein zentrales Element des SCF ist das automatisierte Baustellenlogistiksystem (Parallel Delivery System, PDS), das sicherstellt, dass die Materialien vom Boden auf automatisiertem Wege an den Einbauort gelangen – einerseits in das richtige Geschoss und andererseits an die richtige Stelle. Nachdem das ABCS viele Prozesse automatisiert durchführt, ist hohe Präzision im Bau von Anfang an erforderlich [6].

Ferner arbeitet das ABCS mit einem System für die automatisierte und hochpräzise Aufstellung von Stützen. Das System wird benutzt um Stahlstützen (oder z. B. das SCF selbst) präzise auf einer Betonplatte zu justieren. Der bewegliche Stahlring ermöglicht eine freie Positionierung der Stützen in alle Richtungen. Eine CCD-Kamera überprüft per Bild-

erkennung und Abgleich mit den Plandaten die korrekte Aufstellung. Die Verwendung und Angleichung von Subsystemen des ABCS war im Falle des Tokyo Sky Tree hocheffizient, da der 634 Meter hohe Bau ein außergewöhnliches Projekt ist, das hoher Präzision und technischer Unterstützung bedarf. Folgende ABCS-Teilsysteme sind in abgewandelter Form für den Bau des Sky Tree verwendet worden.

Subsystem 1 –

automatisierte Baustellenlogistik

Aufgrund der Herausforderung von Baustellen in den sehr dichten und überfüllten Gebieten in Tokio, die keine großen Beeinträchtigungen durch Baustellen erlauben, hat Obayashi – ähnlich wie andere große japanische Bauunternehmen – aus der Autoindustrie abgeleitete Methoden für die Anlieferung und Bereitstellung von Bauelementen „just in time and just in sequence“ entwickelt. Eine Reihe solcher Methoden kamen auch beim Bau des Tokyo Sky Tree zum Einsatz. Innerhalb des Stahlkerns ist ein aus dem ABCS heraus entwickeltes Logistiksystem eingerichtet, um die Logistik effizienter zu gestalten. Beim Bau eines 634 Meter hohen Turms zahlt sich diese Installation besonders aus.

Subsystem 2 – Schweißroboter

Aufgrund der Höhe von 634 Metern kann sogar die kleinste Abweichung die Struktur schwächen und die Anpassung anderer großformatiger vorfabrizierter Segmente in darauf folgenden Bauphasen behindern. Wenn eine hohe Präzision abgestimmter angeschlossener Stahlsegmente garantiert werden muss, ist das automatisierte Schweißsystem von Obayashi ein bedeutender Gewinn. Das Schweißsystem schweißt Elemente präzise entlang der Verbindung von beiden gegenüberliegenden Seiten aus parallel zusammen. Das Schweißen von entgegengesetzten Seiten aus oder in einem eigens vorgegebenen Ablauf garantiert, dass die Verbindungen und Segmente sich während des Schweißvorgangs nicht verbiegen.

Subsystem 3 – Automatisiertes Setzen von Stützen

Der Bau des 634 Meter hohen Tokyo Sky Tree bedarf hoher Präzision um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen. Aus diesem Grund wurde das lasergestützte ABCS Subsystem für die automatisierte und hochpräzise Ausrichtung von Bauelementen eingesetzt. Für den Bau des Sky Tree wurde dieses System an die Gegebenheiten angepasst.

4 Ausblick

Da Japan regelmäßig von Erdbebenkatastrophen, Tsunamis, Taifunen, Bränden und Kriegszerstörung getroffen wird, hat Japan diese Desaster nicht nur bewältigt, sondern offensichtlich als Grund genommen, neue Technologien und Strategien zu entwickeln. Regelmäßige Katastrophen sind sicher ein Grund, warum Japans Bauindustrie heute so weit fortgeschritten ist. Ebenfalls kann man nachweisen, dass Kriegszerstörung und Schäden durch Erdbeben regelmäßig hohen Bedarf an Gebäuden in kurzer Zeit auslösten und da-

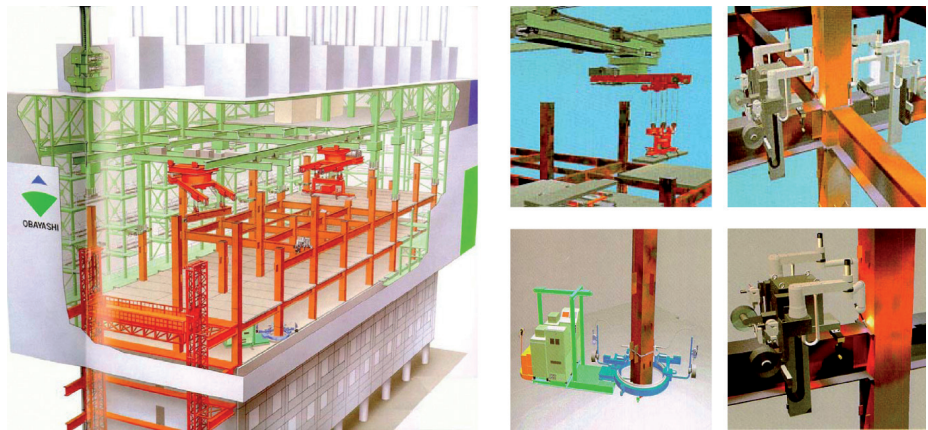


Bild 8. Automated Building Construction Systems (ABCS), Obayashi, Japan.
© Obayashi Corporation Japan, Sky Tree Projekt, Wakizaka
Fig. 8. Automated Building Construction Systems (ABCS), Obayashi, Japan

mit die Entwicklung industrialisierter und automatisierter Baumethoden beschleunigten. Auch die qualitativ hochwertigen Wohnhäuser, die japanische Firmen wie Sekisui House, Daiwa House und Sekisui Heim eher als eine Art Produkt (und nicht als klassisches Bauwerk) anbieten, sind Ergebnis einer enormen Nachfrage nach taifun- und erdbebensicheren Häusern. Firmen wie Obayashi, Kajima, Shimizum, Takenaka und auch kleinere Firmen, die mit der Bauausführung von Gebäuden zu tun haben, geben hohe Summen für die Forschung und Entwicklung neuer effizienter Technologien zur Erdbebensicherheit aus. In Anbetracht dieser Tatsache kann vermutet werden, dass Japan die Katastrophe vom März 2011 (Erdbeben, Tsunami, Atomunfall) wieder einmal als Auslöser nimmt, die im Bauwesen zum Zuge kommenden Technologien und Prozesse sprunghaft voranzutreiben. Es ist sehr wahrscheinlich, dass Japan nach drei bis fünf Jahren intensiver Forschung und Entwicklung, welche Katastrophenschutz eine weltweit führende Stellung einnehmen wird.

Literatur

- [1] Sky Tree Project: skytree-obayashi.com
- [2] Science Channel: What the Ancients Knew II Shorts: Japanese Construction, Website: <http://science.discovery.com/videos/what-the-ancients-knew-ii-shorts-pagoda-construction.html>, last visited 02.04.2011
- [3] Research Visit at Sekisui House Research Center and Sekisui House Factories in 2009, Interviews and Photos by the authors.
- [4] Studies Prof. Suematsu, Nagoya, interviewed by the authors in 2011
- [5] Bock, T., (2007) Construction Robotics, in Autonomous Robots, Springer Science
- [6] Bock, T., Linner, T., Lauer, W., Eibisch, N. (2010) Automatisierung und Robotik im Bauen. Arch+ Zeitschrift für Architektur und Städtebau, Mai 2010, pp. 34–39
- [7] Bock, T., Linner, T., Lee, S. (2009) Integrated Industrialization Approach for lean Off-/On -site Building Production and Resource Circulation. 7th World Conference on Sustainable Manufacturing, India
- [8] Bock, T., Linner, T. (2009) Automation and Robotics in On-site Production and Urban Mining. New Perspective in Industrialization in Construction – A State-of-the-Art Report, Editors: G. Girmscheid (ETH Zürich), F. Scheublin (Eindhoven University of Technology), CIB-Publication, pp. 281–298, ISBN 978–3–906800–17–2